

细颗粒含量对间断级配土侵蚀的影响

李东锋^{1,2}, 许增光¹, 高 惠², 王党伟², 丁子玥³, 曹 成¹

(1. 西安理工大学水利水电学院; 2. 中国水利水电第三工程局有限公司; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司)

摘要:针对渗流作用下间断级配土内部侵蚀导致的涌砂和结构变形破坏问题,采用土体内部渗流侵蚀试验装置对细颗粒含量为 20%、30% 和 40% 的间断级配土开展了不同水力梯度下的侵蚀试验,基于离散元法研究了颗粒流失、接触力链和孔隙率的变化过程,探究了间断级配土的细观侵蚀规律。结果表明:细颗粒含量越高的试样侵蚀速率越快,侵蚀运动越剧烈;低水力梯度下,出现渗透挤密现象导致孔隙率减小,且孔隙率的变化具有空间差异性;细颗粒含量影响土体内部颗粒间的接触方式,是颗粒流失的诱因,而接触力链的形式变化和颗粒流失的共同作用导致了土体侵蚀破坏。

关键词: 间断级配土; 渗流侵蚀; 细颗粒含量; 离散元模拟

Effect of fine particle content on erosion of gap-graded soils//Li Dongfeng^{1,2}, Xu Zengguang¹, Gao Hui², Wang Dangwei², Ding Ziyue³, Cao Cheng¹ (1. School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology; 2. Sinohydro Engineering Bureau 3 Co., Ltd.; 3. POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited)

Abstract: To address the problems of sand boiling and structural deformation failure induced by internal erosion in gap-graded soils under seepage action, erosion tests under different hydraulic gradients were conducted on gap-graded soil specimens with fine particle contents of 20%, 30%, and 40% using an internal seepage erosion apparatus. Based on the discrete element method, the evolution processes of particle loss, contact force chains, and porosity were analyzed, and the mesoscopic erosion characteristics of gap-graded soils were explored. The results show that specimens with higher fine particle contents exhibit higher erosion rates and more intense erosion processes. Under low hydraulic gradients, seepage-induced compaction occurs, resulting in a decrease in porosity, and the variation of porosity exhibits spatial heterogeneity. The fine particle content affects the contact modes among particles within the soil and serves as a triggering factor for particle loss. The combined effects of contact force chain transformation and particle loss lead to erosion-induced failure of the soil.

Key words: gap-graded soil; seepage erosion; fine particle content; discrete element simulation

间断级配土作为一种分布于土石坝、堤坝和路基等工程的土料,其骨架通常以大尺寸的砾石作为结构性支撑,尺寸较小的砂粒和粉粒等细颗粒则自由堆积在砾石骨架孔隙中^[1-3]。当外部渗流场作用于间断级配土体时,孔隙水压力会驱动细颗粒沿粗颗粒孔隙通道发生迁移,并从渗流出口逐渐流失,该过程称为细颗粒侵蚀作用^[4]。由于间断级配土中粗细颗粒分布不连续,细颗粒更容易在渗流作用下发生运移和流失。细颗粒侵蚀不仅会改变土体内部结构,还可能引起土体变形,是导致土石坝渗漏与失稳的重要原因之一。因此,研究细颗粒含量对间断级配土侵蚀演化规律的调控机制,对于建立非均质土体渗流灾变预警模型以及优化抗渗加固设计具有

重要意义^[5]。
为揭示土体渗流侵蚀过程中细颗粒运移机制,学者们开展了多样化的侵蚀试验^[6-7]。早期主要通过传统侵蚀试验研究细颗粒流失问题,如徐烁等^[8]根据骨架的临界细颗粒含量大小对间断级配土体进行分类,并通过试验研究了间断级配砂土渗流侵蚀问题;董辉等^[9]进行了非稳定渗流条件下宽级配砂砾土细粒迁移试验,通过收集流失细颗粒来判断土体内部的稳定性;王晓摇等^[10]借助饱和渗流颗粒迁移试验,研究了粗细颗粒组成的碎石土细颗粒迁移特征及优先流形成路径;Liu 等^[11]研究了围压和细颗粒含量对欠填充间断级配土内渗流的影响机制。

基金项目:国家自然科学基金项目(52179143);陕西省科技创新团队项目(2022TD-01);陕西省教育厅科学研究计划项目——青年创新团队项目(24JP124)

作者简介:李东锋(1975—),男,正高级工程师,博士研究生,主要从事水利工程防渗体施工技术研究。E-mail:lidf@powerchina.cn
通信作者:许增光(1982—),男,教授,博士,主要从事水工渗流与防治研究。E-mail:xuzengguang@xaut.edu.cn

随着测试技术的发展,倪小东等^[12]引入多色填充砂示踪方法实现了对土样中填充细颗粒运移顺序和方向进行判别,从而直观表征了侵蚀过程。此外,透明土模型试验也被用于渗流侵蚀研究,如 Wang 等^[13]采用透明土模拟实际土体,研究了地基中粗细颗粒交界面接触侵蚀的启动和发展过程。现有研究已初步揭示土体渗流侵蚀中细颗粒的运移规律,但细观尺度下细颗粒与骨架颗粒间的碰撞、摩擦等力学行为对运移过程的影响机制仍不明确,如何表征这一细观力学过程仍是当前研究的难点^[14]。

为突破试验观测的技术瓶颈,数值模拟逐渐成为研究渗流侵蚀细观机制的重要手段^[15-16]。吴梦喜等^[17]对一个典型大坝设计方案进行了计算分析,提出了侵蚀对大坝应力变形影响的有限元模拟方法;Kimoto 等^[18]使用渗流-变形耦合方法模拟了由上向下的渗流破坏,考虑了细颗粒的内部侵蚀。有限元法将细颗粒含量简化为均质参数,但无法反映土体颗粒运移过程中颗粒细观参数对侵蚀的影响规律。相比之下,Nie 等^[19]在离散元模拟中探讨了粒径比和细颗粒含量对间断级配土体模型的影响,提出了一种新的稳定评价准则,但仅适用于低细颗粒含量的理想工况;Nguyen 等^[20]应用计算流体力学-离散元(CFD-DEM)耦合方法,研究了颗粒碰撞和流体受到颗粒阻挡时的能量转化;李伟一等^[21]对渗流前后的土体模型进行三轴模拟试验,研究了不同围压、细颗粒含量和水力梯度下的细颗粒流失率等参数变化规律。尽管已有研究通过试验与 CFD-DEM 耦合方法揭示了间断级配土侵蚀的宏观规律与部分细观现象,但侧重于侵蚀结果的描述或理想化模型下的颗粒运移,对于细颗粒含量如何通过调控土体内部细观结构(如力链网络、接触演化)来主导侵蚀过程动态演化的机制仍缺乏系统阐释^[22-23]。

本文采用自主研发的土体内部侵蚀试验装置对不同细颗粒含量间断级配土分级施加水头开展内部侵蚀试验研究,通过细颗粒累计侵蚀率、颗粒空间分布特征揭示细颗粒含量对间断级配土内部侵蚀的宏观影响,并基于离散元法,从颗粒流失、接触力链与孔隙率变化过程探究了不同细颗粒含量对间断级配土内部侵蚀的影响规律,以期对评价间断级配土内部侵蚀风险提供理论依据。

表 1 间断级配土内部稳定性判定

试样编号	细颗粒含量/%	D_{15c}/mm	d_{85f}/mm	D_{15c}/d_{85f}	判定结果
C1	20	6.03	0.95	6.35	不稳定
C2	30	5.95	0.94	6.33	不稳定
C3	40	5.86	0.91	6.44	不稳定

注: D_{15c} 、 d_{85f} 为通过筛分后粗、细颗粒部分累计质量百分数分别为 15% 和 85% 时对应的粒径,两者比值大于或等于 4 时判定为不稳定土。

1 侵蚀试验

1.1 试验材料

采用 0.5~1 mm 细颗粒和 5~10 mm 粗颗粒配置成级配不连续的间断级配土作为试验材料,其中粗颗粒作为骨架,细颗粒为骨架间的填充物。将细颗粒质量占总质量的百分比定义为细颗粒含量,共设置 3 种工况对细颗粒含量分别为 20%、30% 和 40% 的理想间断级配土(试样 C1、C2、C3)进行渗流侵蚀试验,颗粒级配曲线和试验材料如图 1 所示。

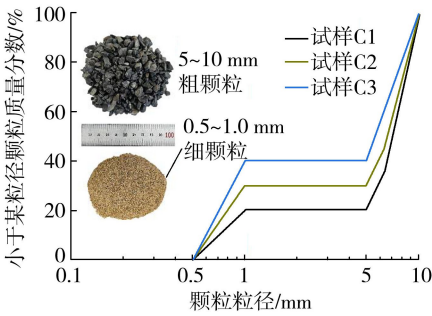


图 1 间断级配土颗粒级配曲线

试验前,采用常用的几何判定准则(Kézdi 法^[24])对不同细颗粒含量的间断级配土进行稳定性评价,结果如表 1 所示,可知细颗粒含量为 20%、30%、40% 的试样均为渗透不稳定土。

1.2 试验装置及方案

采用自主研发的土体内部侵蚀试验装置(图 2)开展试验。该试验装置主要由水箱、土体侵蚀容器(直径 40 mm,高度 80 mm)、收集装置等组成,由透明的亚克力玻璃制作,具有良好的可视性,通过摄像设备实时观测细颗粒侵蚀情况,控制水箱的高度调整水流压力,在入口处铺设鹅卵石以提供缓存作用,保证入渗均匀性。

为探究不同细颗粒含量对间断级配土内部侵蚀的影响规律,开展不同水压力作用下的侵蚀试验。将粗细颗粒均匀混合,分 4 次进行填筑,每次填充高度为 20 mm,保证试样均匀性。参照文献[25],水力梯度从 0 加载至 6,每次增加 0.5 个水力梯度开展试验,持续增加水压力使试样中细颗粒发生迁移,直至流出的水流澄清,试验结束。同一工况下,进行 3 次平行试验,试验结果取平均值以减小误差。

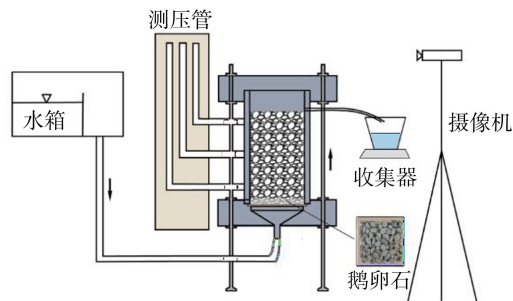


图2 土体内部侵蚀试验装置

1.3 试验结果与分析

1.3.1 细颗粒侵蚀规律

细颗粒累计侵蚀率为侵蚀的细颗粒质量与试样初始总重量之比,是反映间断级配土侵蚀程度的重要参数。图3为3种试样细颗粒累计侵蚀率,可以发现,3种试样的累计侵蚀率随水力梯度的变化而不同,试样C2和C3在水力梯度为0.5时出现细颗粒流失,而试样C1在水力梯度为1时才出现细颗粒流失。在水力梯度相同时,试样C3侵蚀程度最大,最高累计侵蚀率为10.72%;而试样C1侵蚀程度最低,最高累计侵蚀率为8.59%。结果表明,细颗粒含量的增加会加速侵蚀速率,从而影响其渗透稳定性。3种试样的细颗粒累计侵蚀率随水力梯度的增大而增大,根据侵蚀速率变化规律将侵蚀过程分为3个阶段:①细颗粒快速流失阶段。此阶段在水力梯度较小($i \leq 2$)时发生,随着水压力增大,细颗粒在粗颗粒形成的骨架中移动,细颗粒快速流失,此时水流较浑浊,试样内部细颗粒分布不断变化。②骨架重塑阶段。随着水力梯度继续增大,粗颗粒发生移动,骨架出现重塑现象,细颗粒流失速率开始减慢。③相对稳定阶段。此阶段骨架重塑基本完成,已形成渗流通道,水流较为澄清,仅少部分细颗粒被带出。

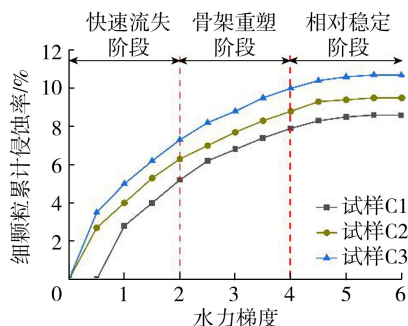
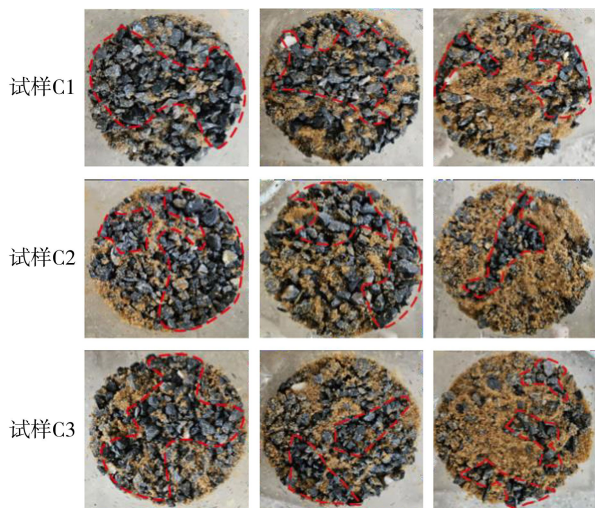


图3 试样细颗粒累计侵蚀率

1.3.2 不同深度处细颗粒分布

图4为试验结束后距底部20、40、60 mm处试样横截面。红色为试样的侵蚀区域,可以发现试样的中部和底部侵蚀更为严重,大量细颗粒随着水压力的增大而流失。试样不同的区域侵蚀范围不同,表明细颗粒侵蚀发生和发展具有空间随机性。

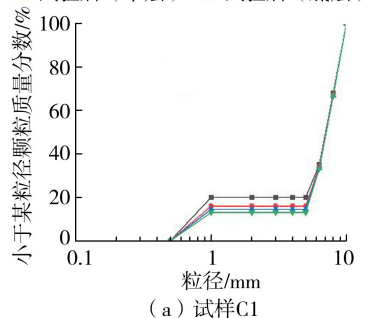


(a) 距底部20 mm (b) 距底部40 mm (c) 距底部60 mm

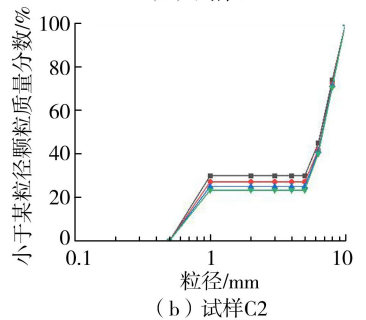
图4 不同深度处试样侵蚀截面

试验结束后,分层取出试样并烘干筛分。试验后上层、中层和底层颗粒级配曲线如图5所示。可以发现,土体侵蚀后的颗粒级配曲线均在原试样级配曲线的下方,而细颗粒部分变化较大,粗颗粒部分变化较小。说明土体内部不同区域的侵蚀程度不同,细颗粒流失较多,而粗颗粒流失较少。在向上渗

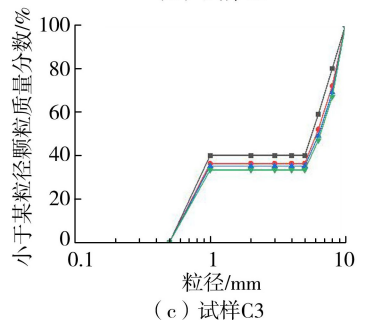
→ 试验前 → 试验后（上层）
→ 试验后（中层） → 试验后（底层）



(a) 试样C1



(b) 试样C2



(c) 试样C3

图5 试验前后试样颗粒级配曲线

流作用下,试样底部因承受更大自重而结构相对不稳定,水流优先扰动并携带底部不稳定孔隙中的细颗粒运移,部分向上运移的细颗粒在途中被骨架拦截,未能充分补充至顶部,侵蚀程度最终形成“自下而上递减”的空间分布特征。3组试验土体级配曲线形状基本没有发生变化,说明侵蚀导致的细颗粒流失未改变原有试样的级配,不同空间区域的细颗粒流失状态基本一致。

2 间断级配土侵蚀离散元模拟研究

2.1 模型构建

本文采用 PFC^{3D} 软件,通过设置参数对颗粒间的接触力和位移进行求解,从而构建 DEM 离散元模型,模型构建流程如下:设置参数(摩擦系数、颗粒密度、颗粒粒径、颗粒重叠比、墙体模量)→设置计算区域→生成墙体模型→颗粒填充→运行模型→模型平衡。

根据渗流侵蚀试验的土体颗粒级配构建一个直径 40 mm、高 80 mm 的非线性 Hertz-Mindlin 接触模型,由于颗粒最大与最小粒径的比值($d_{\max}/d_{\min}$)较大,PFC^{3D} 软件数值计算速度较慢^[26],因此模拟分析中将 0.5~1.5 mm 的细颗粒简化为 1.0~1.2 mm、5~10 mm 的粗颗粒简化为 8.3~8.5 mm。其中颗粒摩擦系数设为 0.5,重叠比为 0.18,密度为 2500 kg/m³,墙体模量为 100 MPa,泊松比为 0.3^[27-29]。利用 MesoMR23-060H-I 型核磁共振仪测得 20%、30%、40%细颗粒含量土样的初始孔隙率分别为 0.26、0.24、0.21。假设颗粒为球形刚体,构建不同细颗粒含量的离散元模型如图 6 所示。

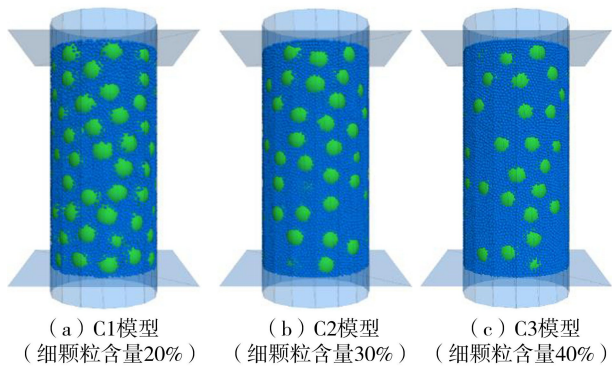


图 6 不同细颗粒含量的试样离散元模型

2.2 模型设置

本文基于每个流体单元所含颗粒大于 100 个的原则对原型试样的计算模型进行网格剖分^[30](图 7),通过控制水压力来模拟不同的水力梯度条件,水力梯度为 1~6,流体单元每计算 0.1 s 增加一个水力梯度。PFC^{3D} 计算模型时间步长设置为

2.0×10^{-7} s,CFD 时间步长设置为 2.0×10^{-5} s,每 0.02 s 保存一次数据,当土体模型内部的颗粒完全被水流冲出时,计算结束。

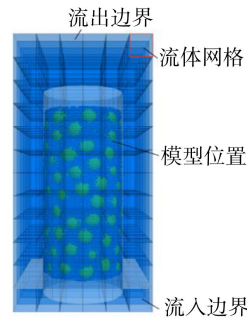


图 7 流体单元网格剖分

为研究渗流作用下不同细颗粒含量土样的内部颗粒堆积情况和接触动态变化过程,在模型内不同位置放置半径为 17 mm 的测量球(图 8),按照文献[31]的方法,对孔隙率、接触数目、颗粒位移等变量进行监测。

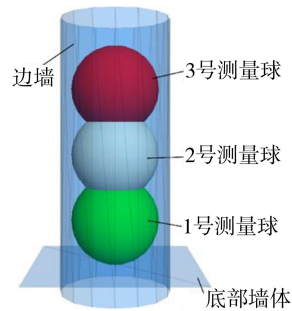


图 8 测量球位置

2.3 模拟结果与分析

2.3.1 颗粒流失变化过程

图 9 为不同细颗粒含量模型颗粒流失过程,可以发现,在 0.1~0.3 s 时段,C1 模型内部细颗粒在粗颗粒骨架间运动,具有明显的纵向迁移行为,在计算时刻 0.4 s 时,模型整体上升且颗粒逐层流出容器。C2 和 C3 模型在 0.1 s 时细颗粒流出容器,且 C3 模型表层颗粒运动更剧烈,细颗粒流失更多。在 0.2 s 以后,3 种模型内部细颗粒减少,粗颗粒重新排列,细颗粒在孔隙内部重新填充,模型内颗粒整体上升,粗颗粒携带细颗粒逐层冲出容器边界,这是由于模型顶部为自由流出边界,底部为固定壁面,向上渗流力克服颗粒自重与摩擦力,推动颗粒整体运动,模拟了实际土体内部侵蚀破坏的过程。C1、C2、C3 模型试样的底层抬升高度基本一致,但细颗粒含量的增加加速了细颗粒的运动,提前了模型整体上升的时间节点。随着水力梯度的增大,出现粗颗粒流出容器的现象,说明破坏发生,但不同细颗粒含量的模型破坏时间不一致,C1、C2、C3 模型分别在 0.3、0.3、0.2 s 发生破坏。此过程为骨架重塑阶段,细颗

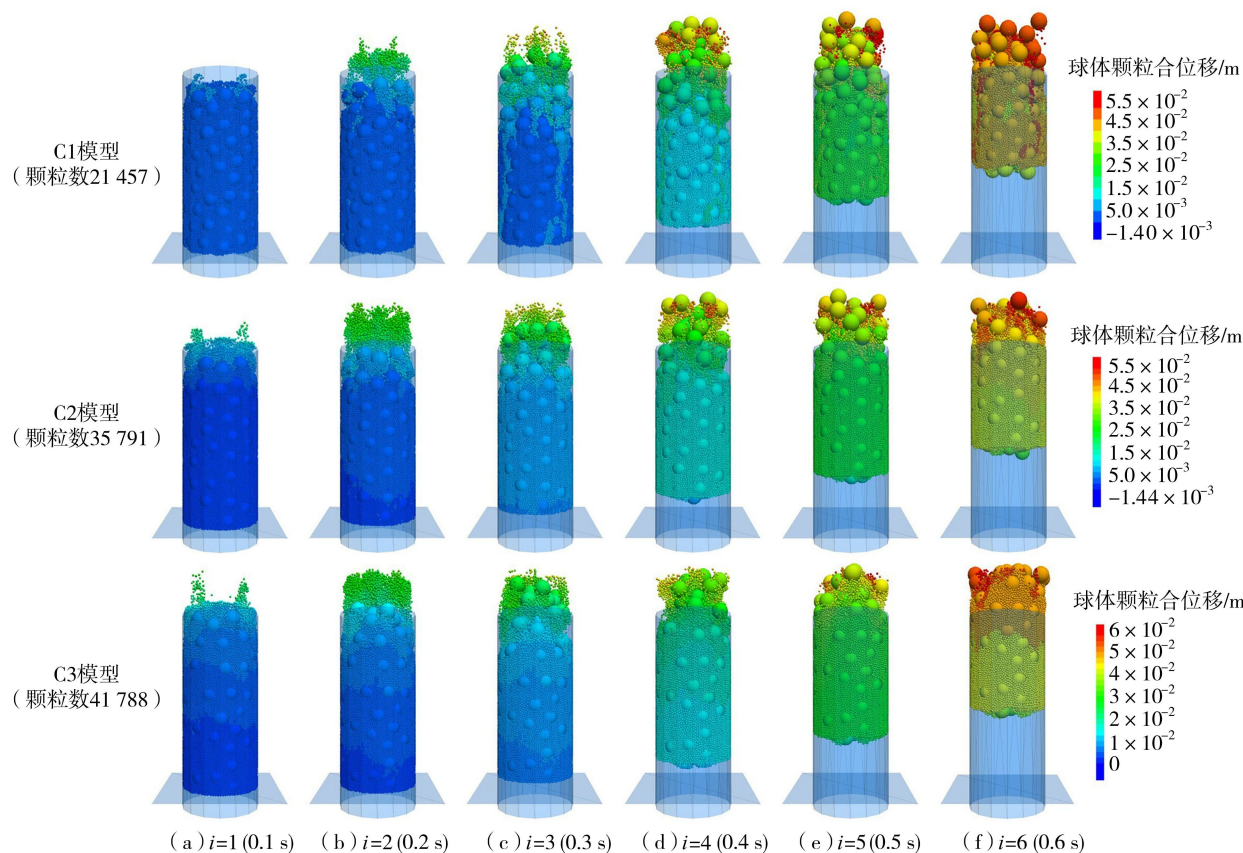


图9 不同细颗粒含量模型颗粒流失过程

粒流失速率减小,试样内部粗颗粒重新排列。值得注意的是,数值计算是在理想条件下进行的,因此侵蚀过程中粗颗粒流失较多,而试验中未发现粗颗粒大量流失。通过上述分析,以粗颗粒冲出圆柱形容器边界作为临界破坏状态,将间断级配土的颗粒流失过程分为两个阶段,在临界破坏发生前,试样内部颗粒出现侵蚀和表层细颗粒流失,在临界破坏发生后,粗颗粒在细颗粒带动下流失,试样整体上升破坏。侵蚀首先沿阻力最小的连通孔隙发生,细颗粒含量越高,可参与运移的颗粒越多,渗流路径越多,从而加速了整体流失进程,表明细颗粒迁移具有优先路径的特性。

2.3.2 接触力链变化过程

接触力链是颗粒之间相互接触形成的抵抗水流作用的内部结构,可以有效反映颗粒间的受力和接触情况。C1、C2 和 C3 模型由于细颗粒含量的不同,初始力链结构也不同,C1 模型粗颗粒之间形成的接触较多,而 C2 和 C3 模型细颗粒之间形成的接触较多。图 10 为不同细颗粒模型接触力链变化过程,在水力梯度为 1~3 时,C1 模型表层处仅有少量力链,是试样以单颗粒的形式流出过程中相互接触所形成的;之后粗颗粒移动导致细颗粒在骨架间重新填充,力链形式发生改变,颗粒之间接触增多,出口处出现伞状力链组,说明此时以颗粒群形式流出。

细颗粒含量的增加会加速颗粒之间的力链形式的变化,C2 和 C3 模型在细颗粒流失阶段已经出现伞状力链,随着水力梯度的增大,所有模型的力链大量涌出,呈现整体流失特征。

C1、C2 和 C3 模型内部接触分别为粗颗粒-粗颗粒接触(强接触)、粗颗粒-细颗粒接触(弱接触)和细颗粒-细颗粒接触(弱接触)。不同接触方式导致形成的力链组成不同,从而影响不同水力梯度下土体内部侵蚀情况。图 11 为 3 种模型接触数目随时间变化曲线,不同接触方式的数目变化情况与土体侵蚀阶段有关(图中阶段 1 为固结沉降阶段,阶段 2 为细颗粒流失阶段,阶段 3 为骨架颗粒流失阶段,阶段 4 为整体上升阶段)。C1 模型由于细颗粒含量较少,初始孔隙率大,在水压力作用下颗粒整体相互挤压,弱接触数目明显增加,强接触数目变化较小,总接触数目持续增长,为固结沉降阶段,见图 11(a);在细颗粒流失阶段,大量细颗粒运移,强接触减小,向弱接触转化;在水力梯度增大至 3 之后,侵蚀速率加快,粗颗粒流失,主要为弱接触。如图 11(b)(c)所示,C2 模型与 C3 模型的各种类型力链数目变化趋势基本一致,从零时刻开始,两种模型的接触数目都出现了骤降,由于 C3 模型内部弱接触数目更多,C3 模型骤降的幅度更大,模型内部力链组成破坏更为严重。随着水流的持续流入,模型内部颗粒不断移

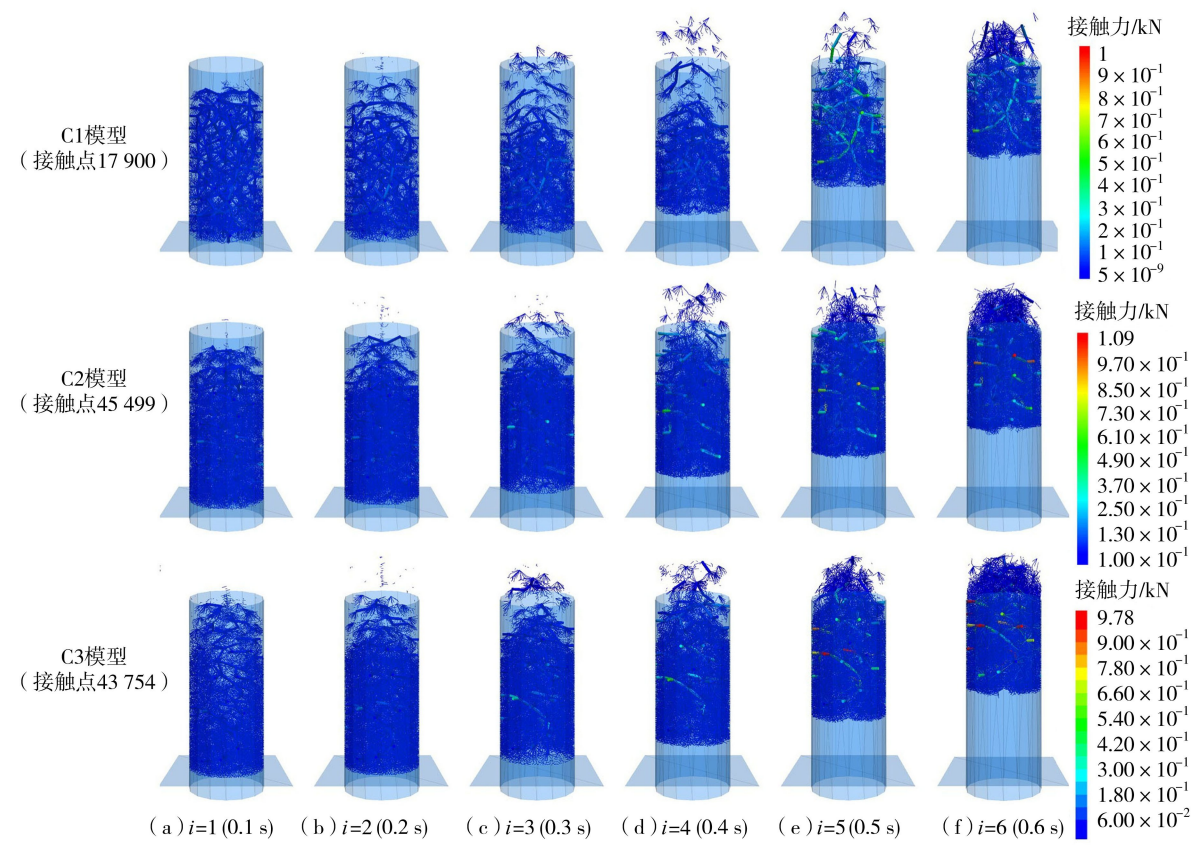


图 10 不同细颗粒含量模型接触力链变化过程

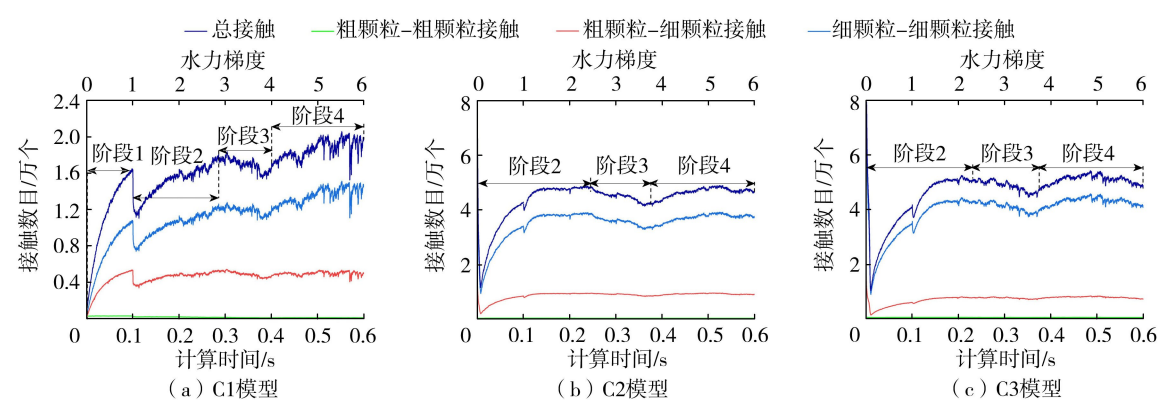


图 11 不同模型颗粒间的接触数目随时间变化曲线

动,C2 和 C3 模型内部总接触数目逐渐增多,直至接触增长稳定时与模型的临界破坏时刻相对应,而 C3 模型在水力梯度为 2 时,总接触数目变化趋势出现变化,说明细颗粒含量增加通过增大弱接触数目导致模型破坏时刻提前。C2 和 C3 模型由于细颗粒含量相对较多,初始孔隙率较小,未出现固结沉降。接触与力链的演变规律表明,细颗粒含量通过控制弱接触数目影响力链网络的初始稳定性,随后在渗流作用下弱接触断裂、颗粒重排与力链动态重构,高细颗粒含量加剧了该过程,从而导致结构失稳提前。

2.3.3 孔隙率变化过程

如图 12 所示,不同细颗粒含量试样的孔隙率变化曲线不同,同一模型的不同区域孔隙率也不同,具

有空间差异性。可以发现,C1、C2 和 C3 模型的表层孔隙率最先增大,C1 模型增加幅度较大,C2 和 C3 模型由于细颗粒含量较多,表层孔隙率增加幅度不大。在计算时间 0.2 s 之前,低水力梯度作用下,出现渗透挤密现象,位于中层和底层区域的孔隙率减小。在 0.2 s 后,粗颗粒流失,试样内部进入骨架重塑阶段,平均孔隙率开始大幅度增大,其中中层和底层孔隙率贡献较大,是因为试样出现了整体上升。这表明同一细颗粒含量的试样在水流侵蚀作用下,不同区域颗粒之间作用效果具有空间差异性,而细颗粒在试样中填充越不均匀,这种差异性越明显。孔隙率的时空变化反映了侵蚀过程中土体内部结构的局部调整与整体失稳,是细颗粒迁移与力链重构

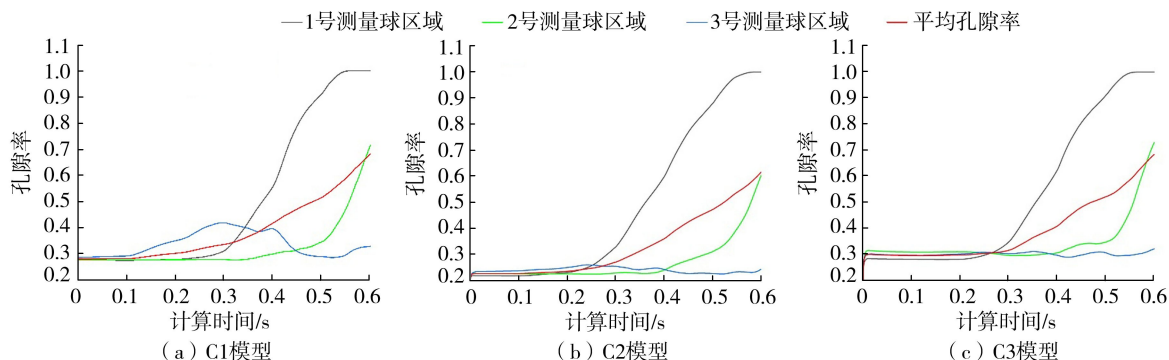


图 12 不同细颗粒含量孔隙率变化曲线

共同作用的宏观表现。

对比不同细颗粒含量模型的平均孔隙率变化曲线可知,细颗粒含量较多的 C2 和 C3 模型在初始水力梯度为 0 时存在突变现象,C3 模型变化更剧烈。这表明细颗粒含量的增加导致初始侵蚀程度更大,因此 C3 模型突变后平均孔隙率最大,在渗流力较小时,中部和底部出现渗透挤密现象,孔隙率短暂下降,随着渗流力的增大,孔隙率也开始持续增大。

3 讨论

细颗粒含量是判定土体稳定性最常用的参数。根据细颗粒在粗颗粒孔隙中的填充情况,将颗粒的堆积情况分为未满足堆积、满足堆积和过满足堆积 3 种形式,其中满足堆积又根据粗细颗粒分布是否均匀分为均匀满足和均匀不满足堆积两种形式,假定模型内部粗颗粒都为矩形排列,用不同颜色区分粗颗粒和细颗粒,3 种堆积形式如图 13 所示。

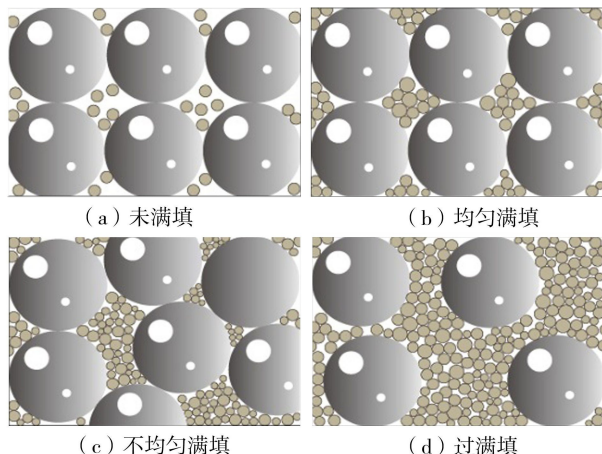


图 13 模型内部颗粒的堆积形式

值得注意的是,C1、C2 和 C3 模型与 3 种堆积方式不是一一对应的。当细颗粒较少时,颗粒为悬浮状态,内部粗颗粒与粗颗粒接触占比较大,强接触为土体内部的主要接触,土体内部骨架体系完整,此时颗粒堆积方式为未满足堆积,主要以单颗粒的形式流失。随着水力梯度的增大,细颗粒向上运移,中上

层颗粒堆积方式从未满足堆积向满足和过满足状态转化,以弱接触为主要接触方式,土体内部骨架体系不完整,以粗颗粒群的形式流失,骨架开始重塑,细颗粒重新在孔隙中填充。由上述分析可知,渗流作用下间断级配土内部侵蚀破坏规律为:细颗粒含量决定了土体的堆积状态,而不同堆积状态下土体的不同接触组成决定渗流作用下土体内部颗粒的启动方式,随着颗粒的移动,颗粒之间相互碰撞发生接触,土体内部的接触组成发生变化,最终造成了颗粒的流失和土体的破坏。由此可见,细颗粒含量影响土体内部的接触组成,是颗粒发生流失的诱因,而渗流作用下土体内部侵蚀破坏是接触力链形式变化和颗粒流失共同作用的结果。

4 结论

- 细颗粒含量是影响间断级配土体内部侵蚀程度的重要因素。细颗粒累计侵蚀率随水力梯度的增大而增大,而细颗粒含量的增加会加大侵蚀速率,从而影响其渗透稳定性。
- 细颗粒含量的增加会加速细颗粒运动。在临界破坏之前,主要是土体内部颗粒的侵蚀和表层细颗粒的流失;在破坏发生后,粗颗粒在细颗粒的带动下流失,土体整体上升破坏。
- 土体内部不同区域的孔隙率变化不同,在低水力梯度下,土体中底层出现渗透挤密现象,孔隙率短暂下降,随着水力梯度增大,孔隙率逐渐增大。
- 细颗粒含量影响土体内部颗粒之间接触方式,是颗粒发生流失的诱因,最终是接触力链形式变化与颗粒流失共同作用导致了侵蚀破坏的发生。

参考文献:

[1] 于际都,刘斯宏,王涛,等.间断级配粗粒土压实特性试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(11):2142-2148.
(Yu Jidu, Liu Sihong, Wang Tao, et al. Experimental research on compaction characteristics of gap-graded coarse-grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering,2019,41(11):2142-2148. (in Chinese))
- [2] 罗玉龙,李澳,张海彬,等.不同层间系数条件下双层地基潜蚀可视化试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(1):226-235. (Luo Yulong, Li Ao, Zhang Haibin, et al. Visual experimental study on suffusion in double-layered soil under different retention ratios[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(1):226-235. (in Chinese))
- [3] 王宇,谷艳昌,王士军,等.基于雷诺数的砂砾石管涌过程判别[J].水利水运工程学报,2022(6):113-120. (Wang Yu, Gu Yanchang, Wang Shijun, et al. Discriminating piping process in sandy gravels based on Reynolds number[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(6):113-120. (in Chinese))
- [4] Jiang Xianggang, Wörman A, Cheng Xiaoqing, et al. Internal erosion of debris-flow deposits triggered by seepage[J]. Engineering Geology,2023,314:107015.
- [5] Zhao Yu, Liu Zhun, Liang Teng, et al. Soil fluidisation induced by fine particles migration: insights from the Shenzhen 2015 landfill landslide [J]. Engineering Geology,2024,343:107783.
- [6] 唐凯,郭丹,沈才华,等.细颗粒含量对极细砂渗透性的影响规律和细观机理[J].水利水电科技进展,2021,41(6):46-51. (Tang Kai, Guo Dan, Shen Caihua, et al. Influence rule of fine particle content on sand permeability and its mesoscopic mechanism[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(6):46-51. (in Chinese))
- [7] 陈星欣,苏世灼,张清林.多孔介质中反复注入颗粒迁移特性试验[J].水利水电科技进展,2017,37(5):64-68. (Chen Xingxin, Su Shizhuo, Zhang Qinglin. Experimental study on the particle transport in porous media under repeated injection conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(5):64-68. (in Chinese))
- [8] 徐烁,张学民,王立川,等.基坑漏水漏砂灾害发展的试验及模拟研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(10):4101-4113. (Xu Shuo, Zhang Xuemin, Wang Lichuan, et al. Experimental and simulation study on the development of water and sand leakage disasters in foundation pits [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2024,21(10):4101-4113. (in Chinese))
- [9] 董辉,任佳展,程子华,等.非稳定渗流条件下宽级配砂砾土细粒迁移试验研究[J].长江科学院院报,2023,40(12):96-102. (Dong Hui, Ren Jiazhan, Cheng Zihua, et al. Experimental study on fine particle migration in widely graded gravel soil under unsteady seepage condition[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023,40(12):96-102. (in Chinese))
- [10] 王晓瑶,樊秀峰,简文彬,等.碎石土细颗粒迁移特征及优先流形成路径[J].工程地质学报,2024,32(2):387-396. (Wang Xiaoyao, Fan Xiufeng, Jian Wenbin, et al. Migration characters of gravel soil fine particles and the formation path of preferential flow [J]. Journal of Engineering Geology,24,32(2):387-396. (in Chinese))
- [11] Liu Leilei, Chen Rui, Zhou Chao, et al. Microscopic mechanism of the combined effects of confining pressure and fines content on suffusion in gap-graded underfilled soils[J]. Journal of Hydrology,2023,626:130370.
- [12] 倪小东,左翔宇,孙达明,等.堤基侵蚀型管涌的砂槽试验研究[J].工程科学与技术,2018,50(2):24-31. (Ni Xiaodong, Zuo Xiangyu, Sun Daming, et al. Study on the piping erosion in levee foundation by sand box model test [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(2):24-31. (in Chinese))
- [13] Wang Gang, Yang Jing, Jin Wei, et al. Examining the criteria for contact erosion in granular soil foundations [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics,2023,24(2):66-77.
- [14] 李火坤,王文韬,王姣,等.二元堤基结构堤防管涌机理模型试验[J].水利水电科技进展,2024,44(1):79-88. (Li Huokun, Wang Wentao, Wang Jiao, et al. Model test study on piping mechanism of binary dike foundation structure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(1):79-88. (in Chinese))
- [15] 刘胜,王媛,冯迪.堤防管涌渗流场响应特征的数值模拟[J].水利水电科技进展,2023,43(6):10-16. (Liu Sheng, Wang Yuan, Feng Di. Numerical simulation of response characteristics of seepage field during embankment piping[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):10-16. (in Chinese))
- [16] 张子豪,杨博,顾凯,等.基于分布式应变感测的堤防管涌探测试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):136-142. (Zhang Zihao, Yang Bo, Gu Kai, et al. Experimental study on embankment piping detection based on distributed strain sensing[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026,54(2):136-142. (in Chinese))
- [17] 吴梦喜,余挺,张琦.深厚覆盖层潜蚀对大坝应力变形影响的有限元模拟[J].岩土力学,2017,38(7):2087-2095. (Wu Mengxi, Yu Ting, Zhang Qi. Finite element simulation of influence of deep overburden suffusion on dam stress and deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017,38(7):2087-2095. (in Chinese))
- [18] Kimoto S, Akaki T, Kodama H. Numerical simulation of seepage failure by upward flow considering internal erosion [J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2019,7(2):654-659.
- [19] Nie Zhihong, Zhu Yangui, Zou Jinfeng, et al. DEM study of the microscopic characteristics and internal stability of binary mixtures [J]. Powder Technology, 2019, 352: 314-324.
- [20] Nguyen T T, Indraratna B. The energy transformation of internal erosion based on fluid-particle coupling [J].

- Computers and Geotechnics, 2020, 121: 103475.
- [21] 李伟一, 钱建固, 尹振宇, 等. 间断级配砂土渗流侵蚀现象的计算流体力学-离散元耦合模拟[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3191-3201. (Li Weiyi, Qian Jiangu, Yin Zhenyu, et al. Simulation of seepage erosion in gap graded sand soil using CFD-DEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(11): 3191-3201. (in Chinese))
- [22] Liu Yajing, Wang Lizhong, Hong Yi, et al. A coupled CFD-DEM investigation of suffusion of gap graded soil: coupling effect of confining pressure and fines content [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020, 44(18): 2473-2500.
- [23] Chen Ding, Huang Wenxiong, Huang Dan. A study of overtopping breach process with soil-water erosion using improved smoothed particle hydrodynamics [J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(2): 939-951.
- [24] Kézdi A. Soil physics[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, 1979.
- [25] Wang Tuo, Zhang Fengshou, Wang Pei. Experimental and numerical study of seepage-induced suffusion under K_0 stress state[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2023, 24(4): 319-331.
- [26] 丁子玥, 许增光, 曹成, 等. 渗流侵蚀模拟中离散元模型参数影响性分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 143-152. (Ding Ziyue, Xu Zengguang, Cao Cheng, et al. Influence analysis of discrete element model parameters in seepage erosion simulation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 143-152. (in Chinese))
- [27] 许增光, 武子豪, 曹成, 等. 颗粒形态对间断级配砂砾土内部侵蚀影响研究[J]. 水力发电学报, 2025, 44(7): 97-108. (Xu Zengguang, Wu Zihao, Cao Cheng, et al. Study on impact of particle morphology on internal erosion in gap-graded sand and gravel soils[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2025, 44(7): 97-108. (in Chinese))
- [28] Gelet R, Marot D. Internal erosion by suffusion on cohesionless gap-graded soils: model and sensibility analysis [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2022, 31: 100313.
- [29] Song Yixiang, Chen Xu, Li Zhao. Investigation on the failure mechanism of the internal erosion in inverse grading sand based on DDA and Darcy's law [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 173: 106516.
- [30] Hu Zheng, Zhang Yida, Yang Zhongxuan. Suffusion-induced deformation and microstructural change of granular soils: a coupled CFD-DEM study [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 795-814.
- [31] 丁子玥. 基于离散元模拟的间断级配土细观渗流侵蚀破坏过程分析及机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

(收稿日期: 2025-04-30 编辑: 熊水斌)

(上接第 20 页)

- [10] 潘水波, 邵瑛瑛, 时启燧, 等. 通气挑坎射流的挟气能力[J]. 水利学报, 1980(5): 13-22. (Pan Shuibao, Shao Yingying, Shi Qisui, et al. The self-aeration capacity of the water jet over the aeration ramp[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980(5): 13-22. (in Chinese))
- [11] Rutschmann P, Hager W H. Air entrainment by spillway aerators[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(6): 765-782.
- [12] Wu Jianhua, Ruan Shiping. Cavity length below chute aerators [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(2): 170-178.
- [13] Pfister M, Hager W H. Chute Aerators. I: air transport characteristics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(6): 352-359.
- [14] 时启燧, 潘水波, 邵瑛瑛, 等. 通气减蚀挑坎水力学问题的试验研究[J]. 水利学报, 1983(3): 1-13. (Shi Qisui, Pan Shuibao, Shao Yingying, et al. Experimental investigation of flow aeration to prevent cavitation erosion by a deflector[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983(3): 1-13. (in Chinese))
- [15] 杨永森, 杨永全. 掺气减蚀设施后二维空腔流动计算[J]. 水利学报, 2000(6): 54-60. (Yang Yongsan, Yang Yongquan. Numerical calculation for two-dimensional cavity flow downstream of an aerator [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(6): 54-60. (in Chinese))
- [16] 徐一民, 王伟, 许唯临, 等. 掺气坎(槽)射流空腔长度的计算[J]. 水利水电技术, 2004, 35(10): 7-9. (Xu Yimin, Wang Wei, Xu Weilin, et al. Calculation of the cavity length of jet flow from chute aerators [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(10): 7-9. (in Chinese))
- [17] Chanson M H. Predicting the filling of ventilated cavities behind spillway aerators [J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33(3): 361-372.
- [18] Steiner R, Heller V, Hager W H, et al. Deflector ski jump hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(5): 562-571.
- [19] Pfister M. Jet impact angel on chute downstream of aerator [C]//4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures. Portugal: IAHR, 2012, 1-8.
- [20] 张法星, 徐建强, 徐建军. 掺气坎射流出射角的修正方法[J]. 人民长江, 2010, 41(2): 87-90. (Zhang Faxing, Xu Jianqiang, Xu Jianjun. Correction method for emergence angle of jet flow over aerator [J]. Yangtze River, 2010, 41(2): 87-90. (in Chinese))
- [21] 时启燧. 高速水气两相流[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [22] 孙健. 高拱坝坝身泄洪和消能防冲[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.

(收稿日期: 2025-02-18 编辑: 俞云利)